

中文引用格式:易灿南,肖楠,赵彩俊,等. 摇摆条件下 DCS 操作员键盘输入试验研究 [J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(3): 25-32.
英文引用格式:YI Cannan, XIAO Nan, ZHAO Caijun, et al. An experimental study on DCS operators' keyboard input under sway conditions[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(3): 25-32.

摇摆条件下 DCS 操作员键盘输入试验研究*

易灿南¹教授, 肖楠¹, 赵彩俊^{**1}副教授, 胡鸿¹教授,
高旭²高级工程师, 康银娟¹

(1 湖南工学院 安全与管理工程学院, 湖南 衡阳 421002; 2 中国职业安全健康协会, 北京 100029)

中图分类号:X912.9

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.03.0780

基金项目:湖南省教育厅科学研究重点项目(25A0647);湖南省自然科学基金资助(2024JJ5122);大学生创新创业训练计划项目(S202511528159, S202511528148)。

【摘要】 为降低人因失误,探究摇摆对数字化控制系统(DCS)操作员键盘输入的影响,设计试验获得摇摆条件(静止、低、中和高)下操作员键盘输入(数字、字母和数字字母组合)的绩效和主观评分;运用统计学方法检验摇摆效应及不同类型信息的绩效差异。结果表明:摇摆对键盘输入绩效具有显著主效应,相较静止、低及中摇摆条件,高摇摆条件下字母与组合信息输入的时间和修改次数显著上升,而数字与组合信息输入正确率显著下降。3类信息输入绩效差异显著,数字输入正确率最高且时间最短,字母输入时间最长。摇摆对主观评分影响亦显著,高摇摆条件下输入难度、身体不适、视觉不适和工作负荷的主观评分均显著升高。中和低摇摆条件下输入绩效与难度基本与静止条件一致,仅中摇摆条件下字母输入难度和工作负荷显著高于低摇摆和静止;高摇摆条件下输入绩效显著降低,工作难度、身体和视觉不适以及工作负荷均显著增大。

【关键词】 摇摆条件; 数字化控制系统(DCS); 操作员; 键盘输入; 绩效; 主观评分

An experimental study on DCS operators' keyboard input under sway conditions

YI Cannan¹, XIAO Nan¹, ZHAO Caijun¹, HU Hong¹, GAO Xu², KANG Yinjuan¹

(1 School of Safety and Management Engineering, Hunan Institute of Engineering, Hengyang Hunan 421002, China; 2 China Occupational Safety and Health Association, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to explore the effects of sway on keyboard input of operators in DCS and to reduce human errors, an experimental study was conducted under four sway conditions—static, low, moderate, and high. Operators' performance in numeric, alphabetic, and alphanumeric input tasks, as well as their subjective ratings, were measured. Statistical analyses were employed to examine the effects of sway and to compare performance differences across input types. The results show that sway has a significant main effect on keyboard input performance. Compared with the static, low, and moderate sway conditions, the input time and number of corrections for alphabetic and alphanumeric entries significantly increase under the high-sway condition, whereas the accuracy of numeric and alphanumeric inputs significantly decrease.

* 文章编号:1003-3033(2026)03-0025-08; 收稿日期:2025-10-14; 修稿日期:2026-01-10

** 通信作者:赵彩俊(1988—),女,山西平遥人,博士,副教授,主要从事人因工程、滑跌倒方面的研究。E-mail:2014001846@hnit.edu.cn。

Significant differences are also found among the three input types; numeric input achieves the highest accuracy and shortest completion time, while alphabetic input requires the longest time. Sway also significantly affects subjective evaluations. Under the high-sway condition, perceived input difficulty, physical discomfort, visual discomfort, and workload ratings are all significantly higher. Under low and moderate sway conditions, input performance and perceived difficulty are largely consistent with the static condition, whereas under moderate sway, the perceived difficulty and workload for alphabetic input are significantly higher than those under low and static conditions. Under high sway, overall input performance markedly declines, accompanied by pronounced increases in difficulty, discomfort, and workload.

Keywords: sway conditions; digital control system (DCS); operator; keyboard input; performance; subjective ratings

0 引言

在数字化控制系统 (Digital Control System, DCS) 中, 键盘是主要人机交互工具之一。如核电厂、智慧矿山和海上浮动核电站等 DCS 中均配备键盘以支持监控任务执行。在核电领域, 将键盘上信息输入列入《核电厂人因验证和确认》清单^[1]; 在军事领域, 键盘输入是士官需要掌握重要军事作业技能之一^[2]。当 DCS 处于摇摆环境 (如海上浮动核电站受风、浪和涌作用而周期性晃动) 时, 前庭与视觉系统间的感知冲突会占用大量认知资源, 降低信息处理速度^[3], 进而影响操作员的键盘输入。

摇摆条件下, 能量消耗显著增加^[4], 任务执行难度增大^[5], 人的认知和行动能力大幅下降^[6]。未检索到摇摆条件下 DCS 键盘输入研究成果, 现有研究主要聚焦于视觉搜索^[7-9]、操作 (如触摸屏操作^[10-12]、鼠标^[10-11]、轨迹球^[10-11]) 和监视任务^[13]等。这些研究结果呈现不一致性, 部分研究表明: 摇摆显著影响绩效^[7, 10-12]; 也有学者发现, 摇摆仅显著影响工作负荷, 对绩效影响不显著^[8-9]; 还有研究发现正确率无明显差异, 但任务时长随摇摆级别增加而升高^[13]。在键盘输入方面, 现有相关研究主要集中于振动和摇晃对输入绩效的影响。如振动显著影响输入绩效, 振动级别越高, 绩效越低^[14], 工作负荷越大^[15]; 摇晃同样显著影响飞行过程触摸屏输入绩效和工作负荷^[16-17]。然而, 摇摆《海洋仪器环境试验方法》(GB/T 32065-2015) 是一种特殊晃动形式, 与振动《机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价》(GB/T 13441-2007) 和摇晃《飞行力学 概念、量和符号》(GB/T 14410-2008) 存在本质区别, 其频率通常较低 (<1Hz), 幅度较高 (可能达数米), 且呈现六自由度运动特性。因此, 既有振动和摇晃环境下的研究成果, 难以直接外推至摇摆条件, 摇摆对 DCS

操作员键盘输入的影响机制仍亟待探索。

鉴于此, 笔者拟关注摇摆条件下 DCS 操作员键盘输入, 开展典型 DCS 操作员键盘输入试验, 探究摇摆对输入绩效和工作负荷等的影响, 以期为此类环境下操作员人因可靠性研究提供理论支持。

1 DCS 操作员键盘输入试验方案

1.1 被试

有偿招募 30 名男性被试参与试验, 年龄、身高与体质量分别为 (19.90±0.96) 岁、(175.40±4.60) cm 和 (70.68±10.75) kg, 打字速度为 (17.76±4.36) 字/min。被试熟悉计算机基本操作, 无视觉、阅读和手部运动等影响输入速度和准确性的相关障碍; 无晕车、晕船症状; 无摇摆环境下键盘输入经验。试验前一晚保证睡眠质量, 试验前 24 h 禁止饮酒、喝茶或咖啡以及其他刺激性食物。试验在实验室中进行, 温度和相对湿度分别为 (22.07±0.58)℃、(46.10±13.66)%。

1.2 DCS 操作员键盘输入试验任务

DCS 体系庞大且结构复杂, 常采用标准化编码对设备或系统进行唯一标识, 如大亚湾和方家山核电厂均采用 9 位数字和大写字母组合的编码体系。尽管不同应用场景下 DCS 的编码方式存在差异, 但编码类型可分为数字编码、字母编码和数字字母组合编码 3 类, 以下分别简称数字、字母与组合。

现阶段, 我国正大力推进海上浮动核电站建设, 该类设施依托 DCS 进行监控与管理。受海洋环境中风、浪和涌等因素影响, 其周期性晃动可能削弱操作员作业绩效。DCS 运行时, 操作员需在工作站通过键盘输入完成设备查询、状态确认及参数监控等关键操作, 以保障反应堆安全。基于此, 试验聚焦摇摆环境下 DCS 操作员的键盘输入作业。

为探究摇摆对不同类型信息输入的影响,参考某海上浮动核电站编码体系,采用 9 位编码长度并匹配其核心编码方式开展键盘输入任务。利用 Python 3.11 软件的 random 函数随机生成 3 类键盘输入样本:①数字。从数字 0~9 随机提取 9 位。②字母。从字母 A—Z 随机提取 9 位。③组合。按照“AAA2222AA”格式从 0—9 和 A—Z 随机生成。基于上述设计,通过 Python 3.11 软件搭建键盘输入试验环境,如图 1 所示。

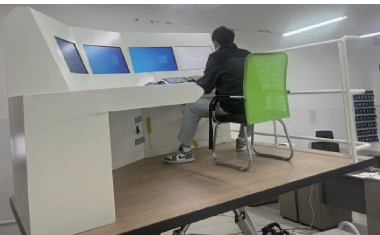


图 1 摇摆条件下键盘输入试验

Fig. 1 Keyboard input experiment under swaying conditions

1.2.1 因变量和自变量

1) 因变量。因变量包括键盘输入绩效和主观评分。键盘输入绩效用完成键盘输入所用时间(简称时间)和输入正确率(简称正确率)来描述。在真实任务执行过程中,DCS 操作员若发现错误会及时

进行修正,COCKBURN 等^[17]将修改次数作为评定任务绩效的指标之一。因此,试验将修改次数作为绩效指标。

在信息输入研究中,常收集工作负荷^[8-9,11,15-17]、身体不适^[12,16]和视觉不适^[7]主观评分数据。在预试验阶段,被试反映在不同摇摆级别下,输入难度存在差异。因此,试验采用 3 个独立 10 分量表分别获取键盘输入难度、摇摆导致身体以及视觉不适的主观评分(评分标准:0 分为无不适/困难,2~3 分为轻微,5 分为中等,7~8 分为不适/困难,10 分为极高)。同时,采用美国国家航天航空局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)开发的任务负荷指数(Task Load Index, TLX)量表,即 NASA-TLX^[18]量化任务执行过程工作负荷。由于输入难度、身体和视觉不适都采用 10 分制评分,NASA-TLX 量表也采用 10 分评定,其中,0 分为非常低,10 分为非常高。参考胡鸿等^[13]研究的做法,将该量表 6 个维度的得分之和作为 NASA 总分,以此表征任务执行过程中的整体工作负荷水平。

2) 自变量。自变量为海洋摇摆条件,该条件以 6 个自由度的运动形式表征。试验参考摇摆条件下相关研究^[4,9,13]设定试验条件,见表 1。

表 1 摇摆条件

Table 1 Swaying conditions

级别	静止		低		中		高	
	幅度/角度	频率/Hz	幅度/角度	频率/Hz	幅度/角度	频率/Hz	幅度/角度	频率/Hz
纵荡	±0 mm	0	±30 mm	0.1	±60 mm	0.1	±90 mm	0.1
横荡	±0 mm	0	±30 mm	0.2	±60 mm	0.2	±90 mm	0.2
垂荡	±0 mm	0	±30 mm	0.1	±60 mm	0.1	±90 mm	0.1
横摇	±0°	0	±6°	0.2	±12°	0.2	±18°	0.2
纵摇	±0°	0	±3.3°	0.1	±6.6°	0.1	±10°	0.1
艏摇	±0°	0	±2.5°	0.1	±5°	0.1	±7.5°	0.1

1.2.2 DCS 操作员键盘输入试验设备

以某海上浮动核反应堆主控室为原型,1:1 搭建操作员计算机工作站(图 1),配置显示器:23.8 英寸,分辨率 1 920×1 080 像素。由六自由度平台实现摇摆条件。

1.2.3 试验流程

所有被试一次完成 4 种摇摆条件下键盘输入试验任务,流程如图 2 所示。

1) 试验准备。介绍试验背景和基本要求,被试填写个人信息,签署知情同意书;通过在线打字软件^[19]测试被试打字速度;介绍 4 种主观量表分值、

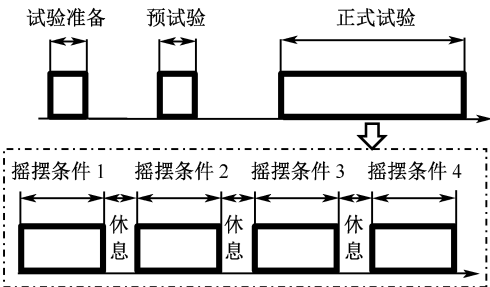


图 2 试验流程

Fig. 2 Experiment procedure

等级及其含义;被试适应摇摆台,不适应者剔除。

2) 预试验。被试按照指令输入信息,直至其反应已经正确理解试验。

3) 正式试验。随机进行 4 种摇摆条件下的输入试验,每一种试验条件下完成 120 次键盘输入(数字、字母和组合各 40 次)。试验结束后,被试依次填写输入难度、视觉不适、身体不适以及工作负荷量表。每 2 种摇摆条件间隔 15 min 以上,且被试反应无疲劳后进入下一试验条件。一种摇摆条件试验时长约为 10 min,整个试验时长约为 2 h。

1.3 数据处理及分析

试验共获得 120 组(30 名被试×4 种摇摆条件)键盘输入绩效和主观评分数据。采用描述性统计分析不同试验条件下键盘输入绩效与主观评分。运用重复测量方差分析以检验摇摆条件对键盘输入的主效应,通过球形检验判断数据是否符合球形假设,若违反该假设,则采用经 Greenhouse-Geisser 校正的自由度、方差分析的 F 统计量(F 值)及其对应的显著性概率 p 值。为明确各试验条件间具体差异,借助

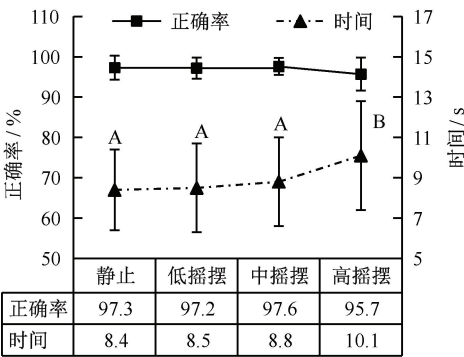
Duncan 事后多重比较法检验键盘输入绩效及主观评分指标的组间差异。利用 Excel 2019 汇总和整理数据,使用 SPSS 19.0 进行统计学分析,显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

2 DCS 操作员键盘输入绩效与主观评分

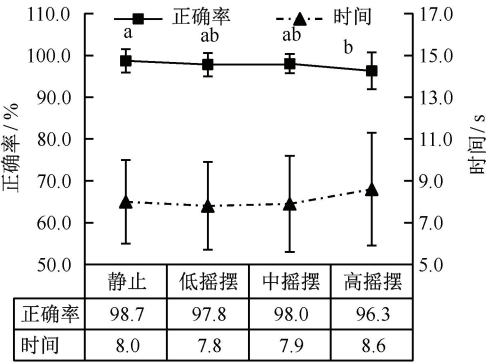
2.1 键盘输入绩效

2.1.1 正确率和时间

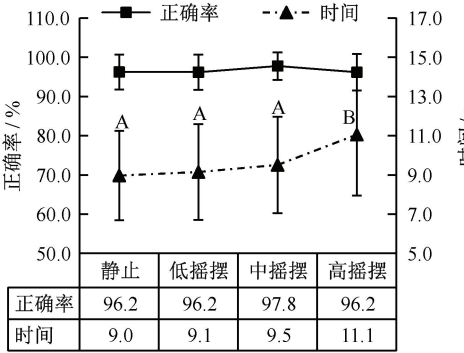
摇摆条件对数字及组合输入正确率存在显著主效应($p<0.05$),对总体、字母及组合信息输入时间亦存在显著主效应($p<0.05$)。Duncan 事后检定结果表明(图 3):在时间指标上,高摇摆条件下总体、字母及组合信息输入时间均显著长于静止、低和中摇摆条件($p<0.05$);在正确率指标上,数字输入在高摇摆条件下显著低于静止条件($p<0.05$),组合信息输入在高摇摆下显著低于低和中摇摆条件($p<0.05$);其余条件间差异均未达到显著水平($p>0.05$)。



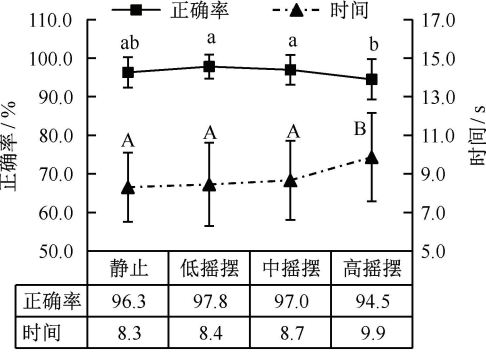
(a) 总体



(b) 数字



(c) 字母



(d) 组合

注:不同字母标识表明不同摇摆条件下键盘输入任务绩效存在统计学差异,a 级别正确率显著高于 B 级别,A 级别时间显著低于 B 级别, $p<0.05$ 。

图 3 摇摆条件下键盘输入绩效

Fig. 3 Keyboard input performance under swaying conditions

3 种信息类型下,正确率和时间差异显著($p<0.05$)。数字正确率显著高于字母和组合($p<0.05$),字母和组合无显著差异($p>0.05$);3 种信息类型输入时间差异显著($p<0.05$),数字最短,字母最高。摇摆和信息类型对正确率和时间无二阶效应,见表 2。

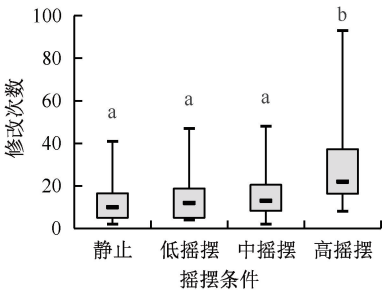
表 2 不同信息类型正确率与时间

信息类型	正确率/%	时间/s
数字	97.67±3.25	8.07±2.29
字母	96.58±4.30 [*]	9.67±2.69 [*]
组合	96.42±4.24 [*]	8.82±2.15 ^{*#}

注:^{*}表示与数字信息相比差异显著;[#]表示与字母信息相比差异显著, $p<0.05$ 。

2.1.2 修改次数

摇摆条件对修改次数存在显著主效应($p<0.05$)。高摇摆下修改次数(22 次)显著高于静止(10 次)、低(12 次)和中摇摆(13 次),如图 4 所示。



注:a、b 代表不同级别,b 级别修改次数显著高于 a 级别, $p<0.05$ 。

图 4 摇摆条件下键盘输入任务修改次数
Fig.4 Number of modifications in keyboard input tasks under swaying conditions

2.2 主观评分

2.2.1 输入难度评分

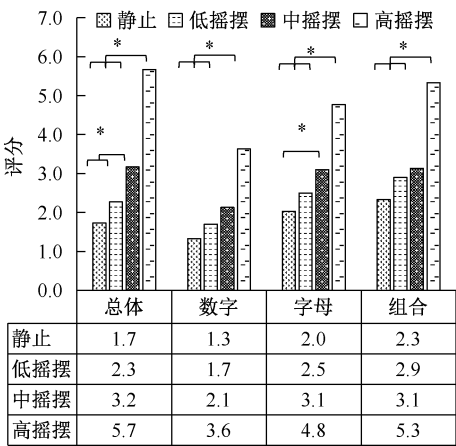
摇摆条件对输入难度评分存在显著主效应($p<0.05$)。高摇摆下数字、字母以及组合信息输入难度显著高于其他 3 种条件($p<0.05$),中摇摆下字母显著高于静止($p<0.05$),如图 5 所示。

2.2.2 摇摆身体不适评分

摇摆条件对身体不适评分存在显著主效应($p<0.05$)。所有条件下评分差异显著($p<0.05$),高摇摆条件下评分最高,其次依次为中、低和静止条件,如图 6 所示。

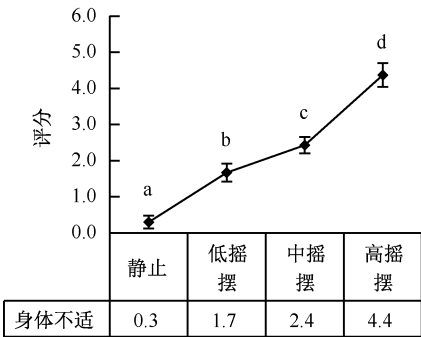
2.2.3 摇摆视觉不适评分

摇摆条件对视觉不适评分存在显著主效应



注:^{*}表示 $p<0.05$ 。

图 5 摇摆条件下键盘输入难度主观评分
Fig.5 Subjective ratings of perceived keyboard input difficulty under swaying conditions



注:a、b、c、d 代表不同级别, $p<0.05$ 。图 7 同。

图 6 摇摆身体不适主观评分
Fig.6 Subjective ratings of swaying discomfort of body

($p<0.05$)。高摇摆显著高于其他 3 种条件($p<0.05$),中摇摆显著高于静止($p<0.05$),其他差异不显著($p>0.05$),如图 7 所示。

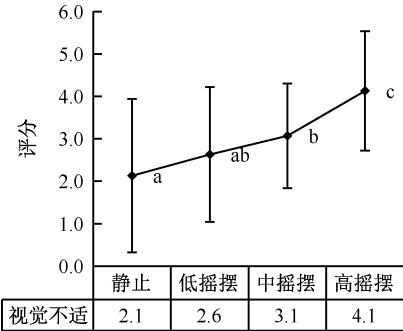


图 7 摇摆视觉不适主观评分
Fig.7 Subjective ratings of swaying discomfort of visual perception

2.2.4 工作负荷评分

摇摆条件对工作负荷存在显著主效应

($p<0.05$)。高摇摆下 NASA-TLX 量表 6 个维度评分以及 NASA 总分均显著高于静止($p<0.05$)；高摇摆下心智需求、体力需求和总分显著高于中和低

($p<0.05$)；中摇摆下体力需求和总分显著高于静止($p<0.05$)；其他差异不显著($p>0.05$)，见表 3。

表 3 NASA-TLX 评分
Table 3 Ratings of NASA-TLX

条件	心智需求	体力需求	时间需求	工作绩效	努力程度	挫折程度	NASA 总分
静止	2.10±1.45	1.50±1.38	2.10±1.9	1.70±1.29	2.50±1.78	1.37±1.27	11.27±6.76
低摇摆	2.20±1.38	2.13±1.87	2.43±1.92	2.30±1.86	3.43±1.92	1.93±1.64	14.43±7.60
中摇摆	2.70±1.47	2.83±1.44*	2.80±1.75	2.23±1.30	3.37±1.47	2.03±1.25	15.97±6.20*
高摇摆	3.97±1.79*#◇	4.17±1.74*#◇	3.80±1.94*	3.27±1.78*	5.10±1.94*	3.27±1.80*	23.57±7.84*#◇

注：*表示与静止条件相比差异显著；#表示与低摇摆条件相比差异显著；◇表示与中摇摆条件相比差异显著， $p<0.05$ 。

3 摇摆条件下键盘输入机制及展望

3.1 摇摆对 DCS 操作员键盘输入的影响机制

试验结果显示：①摇摆条件下 DCS 操作员键盘输入任务时间随摇摆级别增加而升高，且高摇摆下显著高于静止、低和中摇摆($p<0.05$)，这一特征与振动^[15]和摇晃^[17]环境下的触摸屏输入、摇摆^[11-12]和摇晃^[16]环境下点击操作的研究一致；②摇摆对输入正确率的主效应虽未达到统计学显著水平($p>0.05$) (图 3a)，但呈现明显下降趋势，此趋势与摇摆环境下非键盘输入任务^[11]、振动环境下触摸屏任务^[15]以及摇晃环境下输入任务^[16-17]的研究结果吻合；③摇摆显著影响修改次数，高摇摆条件下显著高于其他 3 种试验条件($p<0.05$)。由此可见：虽然摇摆区别于振动和摇晃，但在对操作员任务绩效的影响上存在相似性。以上结果可能由以下原因导致：

1) 空间定向紊乱的级联干扰。摇摆条件通过前庭-视觉-本体感觉系统的协同紊乱影响 DCS 操作员键盘输入绩效。人体空间认知依赖前庭、视觉和本体感觉信息，这些信号经大脑顶叶、颞叶及小脑整合后形成空间感知。试验采用低频 (0.1 ~ 0.5 Hz) 摇摆条件，易与前庭系统共振，引发三级递进干扰：①感知层定位偏差，前庭-视觉冲突干扰大脑顶叶对空间位置信息的整合加工^[20]，导致姿态与目标定位精度下降，定位误差高于静止条件。②认知资源竞争性消耗，为维持平衡，躯干肌肉持续微调，肌肉、肌腱及关节中的本体感觉器将信号持续传入中枢神经系统，占用注意力资源^[21]，减少可分配至键盘输入任务的认知资源。③运动控制精度受损，前庭信号紊乱与本体感觉过载叠加，干扰小脑协调精细运动，致键盘输入时空精度下降，进而影响键盘输入的准确性。后续将通过同步采集生理心理数

据量化上述干扰效应。

2) 认知资源分配的动态失衡。在摇摆环境中，DCS 操作员需同时维持身体平衡并进行键盘输入。根据多资源理论^[22]，平衡维持属躯体运动加工，而键盘输入涉及视觉识别与精细运动控制，二者在资源占用上部分重叠，形成竞争关系。该竞争随摇摆强度呈动态失衡特征，表现为：①低摇摆条件下，平衡维持占用资源较少，输入任务获得充足支持，反应时、正确率及修改次数与静止条件差异均无统计学意义($p>0.05$)。②中摇摆条件下，随幅度增大，平衡维持资源需求增加，输入任务资源受限，但未达临界阈值，反应时与修改次数虽增，差异仍不显著($p>0.05$)，正确率仅小幅波动。③高摇摆条件下，平衡维持占用急剧增加，认知-运动通道资源饱和，导致正确率显著下降，时间和修改次数显著上升($p<0.05$)。

试验结果还显示，摇摆对输入难度主观评分 (图 5 中总体)、身体不适评分 (图 6)、视觉不适评分 (图 7) 和工作负荷评分 (表 3 中 NASA 总分) 均存在显著影响($p<0.05$)。其中，不同摇摆级别下工作负荷和身体不适的差异特征与 COUTTS 等^[16]的研究结果一致；视觉不适方面的表现特征与 LIN Chiuhsiangjoe 等^[7]的研究结论相符。

因此，摇摆通过空间定向紊乱与认知资源竞争的耦合作用对 DCS 操作员键盘输入产生负面影响。基于上述机制分析，提出以下优化建议：①采用抗晃键盘托减少躯体微调需求，降低本体感觉信号输入强度。②界面优化 (增大字体对比度、缩短编码长度) 降低视觉-认知负荷。③开发智能预测输入算法，减少运动控制任务量，从而缓解认知资源竞争压力。

3.2 摇摆条件下不同信息输入任务差异机制

摇摆条件下不同类型输入任务的绩效存在显著

差异,数字输入正确率显著高于字母和组合输入($p<0.05$),而后两者间差异无统计学意义($p>0.05$);字母输入时间最长(绩效最差),数字输入最短(绩效最优),三者间差异均达显著水平($p<0.05$)。可能由以下原因导致:

1) 信息编码复杂度的层级干扰效应。数字、字母和组合信息的编码方式存在本质差异,因此,摇摆条件对各类编码的干扰效应不同。数字编码属于单一符号系统,空间布局集中,其信息加工主要依赖大脑顶叶的数量表征与运动皮层的程序化动作记忆^[23],受前庭-视觉冲突的干扰较小。字母编码涉及26个大写字母的符号识别与语义联想,需激活大脑颞叶的语言处理区进行符号-语音转换^[24],且键盘布局分散,在摇摆引发的躯体不稳状态下,视觉聚焦与手指定位的协同难度增加。组合编码融合字母与数字的双重特性,既需要语言区与数量区协同激活,又因混合方式(AAA2222AA)加重工作记忆负荷,在摇摆导致认知资源消耗的背景下,信息转换与格式校验的错误率显著上升。

2) 运动执行模式的适应性差异机制。摇摆条件对精细运动控制的干扰程度与输入任务的运动模式密切相关。数字输入中,被试单手在数字区小范围按键,运动轨迹固定、协同简单,受本体感觉紊乱影响较小;字母输入需双手多指在全键盘进行大范围移动,坐标转换频繁,按键力度与时机差异显著,摇摆引发的躯体微颤放大运动精度误差;组合输入因字母与数字交替出现,运动模式频繁切换,运动计划复杂度增加,前庭信号紊乱对小脑协调功能干扰更突出,导致输入时间延长与修改次数增加。

3.3 研究不足及展望

研究存在以下不足:①被试为青年男性,与执照DCS操作员存在经验差异。有研究发现,年龄是影响作业绩效的因素^[25],但年龄分组差距较大,如年

轻人(<30岁)与年老者(>50岁)。FOZARD等^[26]指出,中、青年阶段,人体反应时与正确率的变化差异不大。我国核电现场操作员以中青年男性为主,决策能力无显著差异^[27]。因此,研究成果可为新入职青年操作员绩效评估提供参考,对中年操作员的绩效评估也具有一定参考价值。然而,执照操作员在任务熟练度与应急经验方面的优势,可能使其在摇摆环境下表现出更强的资源调配能力,导致研究结果在职业场景中的直接迁移存在一定限制。②被试的打字速度较低((17.76±4.36)字/min),与当代青年在语音输入和触摸屏广泛应用背景下键盘技能弱化的趋势一致^[28]。亦反映了新一代操作员的真实输入能力,为数字化转型背景下的培训研究提供针对性参考。③研究揭示了摇摆条件下DCS操作员“空间定向紊乱-资源竞争-输入绩效”的级联机制,但未采集心理生理指标,难以量化摇摆对神经活动的影响。后续将采用脑电与脑功能近红外技术评估大脑顶叶、运动皮层激活强度,并结合眼动数据解析注意力资源分配机制。

4 结 论

1) 低频高幅摇摆条件下,由于空间定向紊乱与认知资源分配动态失衡,键盘输入任务绩效下降,具体表现为时间显著增加,正确率呈下降趋势,错误修正行为显著增多,并伴随输入难度、身体不适、视觉不适及工作负荷的整体上升。

2) 摇摆条件下不同类型信息输入任务因编码复杂度与运动控制方式不同,绩效出现分化,字母绩效最差,数字绩效最优。

3) 未来将在更贴近真实作业条件的摇摆环境中,引入执照操作员样本与心理生理指标,进一步验证与细化空间定向、资源分配与运动控制之间的耦合机制。

参 考 文 献

- [1] GB/T 41145—2021, 核电厂人因验证和确认[S]. GB/T 41145—2021, Human factors verification and validation for nuclear power plant[S].
- [2] 卫静, 李晓军, 焦凯, 等. 连续键盘输入作业疲劳状况研究[J]. 人类工效学, 2014, 20(5): 18-22. WEI Jing, LI Xiaojun, JIAO Kai, et al. Exploring the fatigue characters of operators in continuous typing task through keystroke[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2014, 20(5): 18-22.
- [3] HAMER S, CURČIĆ-BLAKE B, VAN DER ZEE E A, et al. The acute effects of whole-body vibration exercise on cortical activation in young adults: an fNIRS study[J]. Behavioural Brain Research, 2024, 480(5): DOI:10.1016/j.bbr.2024.115381.
- [4] 易灿南, 康银娟, 郑钊, 等. 摇摆条件下数字化工业系统操作员作业疲劳累积特征[J/OL]. 安全与环境学报: 1-13. [2025-10-31]. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2025.0729>.

- YI Cannan, KANG Yinjuan, ZHENG Zhao, et al. Cumulative effects of work fatigue in digital industrial systems under vibration[J/OL]. *Journal of Safety and Environment*; 1–13. [2025–10–31]. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2025.0729>.
- [5] TIAN Yu, SHI Yue, WU Yuzhou, et al. Assessing mouse, trackball, touchscreen and leap motion in ship vibration conditions: a comparison of task performance, upper limb muscle activity and perceived fatigue and usability[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2024, 101(3): DOI:10.1016/j.ergon.2024.103585.
- [6] ABAEI M M, ABBASSI R, GARANIYA V, et al. A dynamic human reliability model for marine and offshore operations in harsh environments[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 173(3): 90–97.
- [7] LIN C, HSIEH Y, CHEN H, et al. Visual performance and fatigue in reading vibrating numeric displays[J]. *Displays*, 2008, 29(4): 386–392.
- [8] TAO Da, REN Xinyuan, LIU Kaifeng, et al. Effects of color scheme and visual fatigue on visual search performance and perceptions under vibration conditions[J]. *Displays*, 2024, 82(2): DOI:10.1016/j.displa.2024.102667.
- [9] XUE Hongjun, TAO Da, WANG Tieyan, et al. Visual search in vibration environments: effects of spatial ability, stimulus size and stimulus density[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2020, 79(5): DOI:10.1016/j.ergon.2020.102988.
- [10] WANG Hailiang, TAO Da, CAI Jian, et al. Effects of vibration and target size on the use of varied computer input devices in basic human-computer interaction tasks[J]. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 2022, 32(2): 199–213.
- [11] LIN C, LIU C, CHAO C, et al. The performance of computer input devices in a vibration environment[J]. *Ergonomics*, 2010, 53(4): 478–490.
- [12] YAU Y, CHAO C, HWANG S. Effects of input device and motion type on a cursor-positioning task[J]. *Perceptual and Motor Skills*, 2008, 106(1): 76–90.
- [13] 胡鸿, 武江, 张勉, 等. 摇摆、时间压力对 DCS 操作员监视绩效和工作负荷的影响[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(11): 9–16.
- HU Hong, WU Jiang, ZHANG Mian, et al. Effects of vibration and time pressure on monitoring performance and workload of operators in DCS[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(11): 9–16.
- [14] CONWAY G E, SZALMA J L, HANCOCK P A. A quantitative meta-analytic examination of whole-body vibration effects on human performance[J]. *Ergonomics*, 2007, 50(2): 228–245.
- [15] GOODE N, LENNE M G, SALMON P. The impact of on-road motion on BMS touch screen device operation[J]. *Ergonomics*, 2012, 55(9): 986–996.
- [16] COUTTS L V, PLANT K L, SMITH M, et al. Future technology on the flight deck: assessing the use of touchscreens in vibration environments[J]. *Ergonomics*, 2019, 62(2): 286–304.
- [17] COCKBURN A, GUTWIN C, PALANQUE P, et al. Turbulent touch: touchscreen input for cockpit flight displays[C]. *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2017: 6 742–6 753.
- [18] HART S G, STAVELAND L E. Development of NASA-TLX (task load index): results of empirical and theoretical research[M]. Amsterdam: North-Holland, 1988: 139–183.
- [19] 打字狗. 打字练习[EB/OL]. [2025–04–30]. [https://dazigo.vip/typing-test/test?id=1535934124326989825 & time=2](https://dazigo.vip/typing-test/test?id=1535934124326989825&time=2).
- [20] YANG Zhao, ZHOU Shuhua, ZHANG Qiyue, et al. A force-sensitive adhesion GPCR is required for equilibrioception[J]. *Cell Research*, 2025, 35(4): 243–264.
- [21] HORAK F B. Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls? [J]. *Age and Ageing*, 2006, 35(2): 7–11.
- [22] WICKENS C D. Multiple resources and performance prediction[J]. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2002, 3(2): 159–177.
- [23] HAWES Z, SOKOŁOWSKI H M, ONONYE C B, et al. Neural underpinnings of numerical and spatial cognition: an fMRI meta-analysis of brain regions associated with symbolic number, arithmetic, and mental rotation[J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2019, 103(8): 316–336.
- [24] PULVERMÜLLER F. Neurobiological mechanisms for language, symbols and concepts: clues from brain-constrained deep neural networks[J]. *Progress in Neurobiology*, 2023, 230(11): DOI:10.1016/j.pneurobio.2023.102511.
- [25] SHI Chao, ROTHROCK L. Investigating the effects of age, task load, task complexity, and input device on monitoring performance for smart manufacturing in the oil refining industry[J]. *Ergonomics*, 2024, 67(1): 102–110.
- [26] FOZARD J L, VERCYSEN M, REYNOLDS S L, et al. Age differences and changes in reaction time: the baltimore longitudinal study of aging[J]. *Journal of Gerontology*, 1994, 49(4): 179–189.
- [27] 崔冉. 中国核电站操纵人员人际关系、决策能力及办事风格因素的初步探讨[D]. 苏州:苏州大学, 2019.
- CUI Ran. Preliminary study on the factors of interpersonal relationship decision-making ability and working style of nuclear power plant operators in China[D]. Suzhou: Soochow University, 2019.
- [28] National Center for Education Statistics. 2019 NAEP high school transcript study (HSTS) user’s guide and technical report: NCES 2023–453[R], 2023.



作者简介：易灿南（1981—），女，湖南宁乡人，博士，教授，主要从事职业安全与健康以及人因工程方面的研究。E-mail: yicannan310@126.com。